文章编号:1000-4939(2023)03-0597-07

基于 ANSYS 的 X70 管道环焊缝裂纹缺陷力磁耦合仿真研究

吴欢欢,刘艳军,黄杰

(西南石油大学机电工程学院,610500 成都)

摘　要:主要利用 ANSYS 有限元模拟软件,以金属磁记忆检测原理和力磁理论为基础,对不同相对深度的环焊缝裂纹缺陷进行静力学分析并进行力磁耦合,得到不同管道运行压力和不同裂纹相对深度下的磁感应强度信号;利用环焊缝裂纹磁场强度梯度值 K 形成的李萨如图形封闭曲线面积,对裂纹磁信号进行了定量分析,找到了封闭区域面积与裂纹相对深度之间的关系。结果表明:此方法可定量的对裂纹缺陷相对深度进行表示,对磁记忆检测定量分析的研究具有良好的实际运用价值。

关键词:裂纹缺陷;磁感应强度;力-磁耦合;李萨如评价

中图分类号:TP391.9;TG115.27　**文献标志码**:A　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.011

Research on force-magnetic coupling simulation of X70 pipeline girth weld crack defect based on ANSYS

WU Huanhuan,LIU Yanjun,HUANG Jie

(School of Mechatronic Engineering,Southwest Petroleum University,610500 Chengdu,China)

Abstract: Based on the principle of metal magnetic memory detection and the theory of force and magnetism,static analysis of the crack defects of the circumferential weld with different relative depths and the force and magnet coupling were carried out by using ANSYS. The magnetic induction intensity signal under different pipeline operating pressure and different crack relative depth was obtained. Using the Lissajous figure closed curve area formed by the girth weld crack magnetic field intensity gradient value K,quantitative analysis of the girth weld crack magnetic signal was carried out,and the relationship between the area of the closed area and the relative crack depth was found. The results show that this method can quantitatively express the relative depth of crack defects,and has good practical application value in the research on quantitative analysis of magnetic memory detection.

Key words:crack defect; magnetic induction; force magnetic coupling; Lissajou evaluation

---

收稿日期:2021-08-26　　**修回日期**:2022-07-31
通信作者:刘艳军。E-mail:liuyanjun@126.com
引用格式:吴欢欢,刘艳军,黄杰. 基于 ANSYS 的 X70 管道环焊缝裂纹缺陷力磁耦合仿真研究[J]. 应用力学学报,2023,40(3):597-603.
WU Huanhuan,LIU Yanjun,HUANG Jie. Research on force-magnetic coupling simulation of X70 pipeline girth weld crack defect based on ANSYS[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(3):597-603.

在焊接过程中,一般在焊接结构的接头部位不可避免的存在应力集中,主要是由材料和焊接工艺的不同引起的,即在焊接过程中由于材料本身的不完善或者焊接工艺的差异等因素,容易产生焊接缺陷以及应力集中[1]。应力集中导致缺陷位置磁畴重新分布,形成与应力相关的磁化矢量。在非励磁条件下(地磁场环境下),通过检测铁磁性材料在应力作用状态下的外部磁感应强度大小及方向分布特征来判断材料的应力及损伤状态,即利用力磁效应判断铁磁管道本体损伤。当外磁场发生变化时,铁磁构件的长度尺寸及体积大小都会发生微小的变化;反之亦然,当铁磁构件尺寸变化时,其磁场状态也会随之变化。磁记忆技术就是一种针对铁磁构件出现的应力集中部位和状况进行诊断的无损检测方法,在预防铁磁构件产生突发性断裂失效及重大事故有较大的经济意义。金属磁记忆技术不同于传统无损检测技术,它可通过测量铁磁材料表面弱磁信号,实现对铁磁材料应力集中位置,早期损伤判别以及损伤程度。磁记忆检测技术具有省时、低成本和易操作的优点,被广泛应用于铁磁性金属结构和材料的应力与缺陷的检测评价[2]。

邢海燕等[3]对采用磁记忆检测技术对未焊透缺陷进行分析,并引入动态模糊算法,为磁记忆检测的焊缝缺陷等级评定提供了新的思路。刘怡等[4]建立力磁耦合模型,讨论了 Q235 钢短裂纹拓展时磁信号的变化趋势,但未建立与裂纹深度与磁信号相关参数的定量关系与评价手段。任尚坤等[5]对含有隐形损伤的焊板进行疲劳试验并检测其磁记忆信号变化,发现采用矢量梯度积分特征和磁场矢量合成梯度特征(李萨如评价)可较好地含有隐形损伤构件进行评估。

本研究主要以长输管道常用的 X70 管道钢为研究对象,采用力磁耦合的方式探讨当长输管道出现裂纹缺陷时其磁信号变化规律,并利用李萨如评价探究在一定内压下的裂纹缺陷深度与李萨如图封闭区域面积之间的定量关系,为后续金属磁记忆检测分析人员判断缺陷危险程度提供思路。

1 力磁耦合模型

当外磁场强度 H 作用在单位体积无附加外力($\sigma=0$)的铁磁体上,若外磁体产生的磁感应强度为 B_1,则可通过下式计算该铁磁体本身所具有的磁能,即

$$W_1 = \frac{B_1 H}{2} \tag{1}$$

此时该铁磁体的磁导率为

$$\mu_1 = \mu_0 \mu_{r1} = \frac{B_1}{H} \tag{2}$$

式中,μ_{r1} 为无外力作用下铁磁体的相对磁导率。

若铁磁体受外力作用,此时铁磁体产生的磁感应强度为 B_2,则该铁磁体本身所具有的磁能 W_2 为

$$W_2 = \frac{B_2 H}{2} \tag{3}$$

该铁磁体的磁导率为

$$\mu_2 = \mu_0 \mu_{r2} = \frac{B_2}{H} \tag{4}$$

式中,μ_{r2} 为外力作用下铁磁体的相对磁导率。

此时可以得出铁磁体在外力作用下磁能的变化量 ΔW,即

$$\Delta W = W_2 - W_1 = \frac{H(B_2 - B_1)}{2} \tag{5}$$

外力作用于铁磁体时,由于力磁效应的影响,铁磁构件内部磁场发生变化,引发此种变化的能量被称为应力能 E_σ,E_σ 的表达式为[6]

$$E_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_m \sigma \cos^2\theta \tag{6}$$

式中:λ_m 为饱和磁致伸缩系数,纯铁的 $\lambda_m = 4.5\times 10^{-6}$;$\sigma$ 表示内应力,拉应力为正,压应力为负,单位为 MPa;θ 表示磁化方向与内应力之间的夹角。当外力方向与磁化方向一致($\theta = 0°$)时,由能量守恒将外力所引起的磁能变化与应力能变化所联立则有

$$W_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_m \sigma \tag{7}$$

此时,铁磁构件中磁致伸缩系数与饱和磁致伸缩系数之间的关系为[7]

$$\frac{\lambda}{\lambda_m} = \frac{B^2}{{B_m}^2} \tag{8}$$

式中,B_m 为铁磁体材料的饱和磁感应强度,单位为 T。则通过能量守恒可以知道,由外力引起的应力能变化和铁磁体磁能变化在相同体积的铁磁体上应相等,即 $|W_\sigma| = \Delta W$

$$\frac{H(B_2 - B_1)}{2} = \frac{3}{2}\lambda\sigma \tag{9}$$

$$(\mu_2 H - \mu_1 H)H = 3\lambda\sigma \tag{10}$$

$$\Delta\mu\left(\frac{B}{\mu}\right)^2 = 3\lambda\sigma \tag{11}$$

将式(8)代入式(11)可得

$$\frac{\Delta\mu}{\mu}=\frac{3\sigma\lambda_m}{B_m^2}\mu_0\mu_{r1} \tag{12}$$

由式(12)可以推导出用于计算铁磁体在外力作用下的相对磁导率,即

$$\mu_\sigma=\frac{B_m^2+\sqrt{B_m^4-12B_m^2\sigma\lambda_m\mu_0\mu_{r1}}}{6\sigma\lambda_m\mu_0} \tag{13}$$

式中:μ_σ 为铁磁材料在外力作用下的相对磁导率;真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m;σ 为铁磁体材料所受到应力,单位为 Pa。

依据式(13)可对外力作用下铁磁体磁导率进行仿真计算,但该耦合方程式也有些许不足,即根号子式的计算值应为正值,以保证应力值在一定范围内,即

$$\sigma\leqslant\frac{B_m^2}{12\lambda_m\mu_0\mu_{r1}} \tag{14}$$

以西气东输工程中最常用的 X70 无缝钢管为例,该钢管的饱和磁感应强度 $B_m=2.5$ T,磁致伸缩饱和系数 $\lambda_m=5\times10^{-6}$,真空磁导率 $\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m,X70 材料初始相对磁导率 $\mu_{r1}=235.07$ H/m [4],可得出应力(负载)的范围为 $\sigma\leqslant352.63$ MPa。

2　模拟过程

为精确地模拟含缺陷环焊缝的力磁特征表象,在本次的仿真中忽略管道上方检测设备对管道磁信号干扰。采用三维实体建模的方式,建立含有明显环焊缝裂纹缺陷的管道模型作为研究对象。在仿真计算中往往需要对实际研究对象进行简化,因此本研究对所建立的模型做如下假设。

1)将环焊缝的焊材与管道母材视为同种金属材料。

2)由于磁记忆检测在管道表面或近表面进行,故忽略管道自重与土壤给予的压力。

3)选取管道周向 1/4 作为研究对象。

模拟过程分为两个阶段,首先对承压管道进行静力学分析,分析在外力作用下,含缺陷的承压管道焊缝处应力集中与负载的对应关系;由力-磁耦合关系式可以得知,应力集中会导致磁导率的改变,所以在静力学的基础之上添加地磁场,建立静磁学模型,得到在地磁场影响下的力磁变化规律。

2.1　几何模型

使用 Ansys-apdl 软件进行仿真需选定材料的单元和属性、创建仿真对象的模型、划分网格、定义边界条件及载荷,再求解计算。选取西气东输某线 X70 管道进行分析,管道材料详细参数[8]如表 1 所示。

表 1　X70 管材基本参数

Tab. 1　Basic parameters of X70 pipe

钢号	泊松比	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	密度/(kg · m^{-3})
X70	0.3	202.86	537	7 850

根据裂纹的受力和位移特点,可将裂纹分为 3 种基本类型,分别是张开型裂纹(Ⅰ型裂纹)、滑开型裂纹(Ⅱ型裂纹)和撕开型裂纹(Ⅲ型裂纹),如图 1 所示。

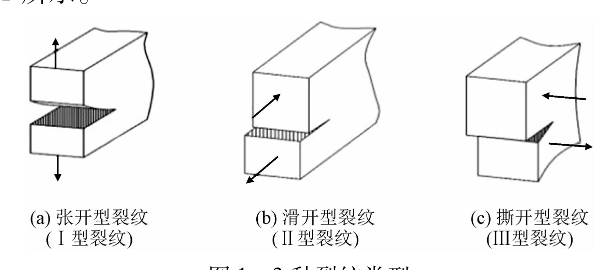


图 1　3 种裂纹类型

Fig. 1　Three crack types

其中Ⅰ型裂纹第三维特征明显,而Ⅱ型、Ⅲ型裂纹两个面虽有相对位移,但第三维尺寸并不明显,宽度极小或无明显宽度,可将其视作面积型缺陷。在本研究中将裂纹视作只具有长度与深度的二维特征缺陷。

截取 100 mm 长管道进行分析管道外径 $\Phi=1\,016$ mm,壁厚 $\delta=14.6$ mm,内压 $p=8\sim12$ MPa,裂纹缺陷分布在管道内壁相对深度为 $h=0.1\delta\sim0.5\delta$,裂纹长度为 10 mm。具体尺寸见图 2。

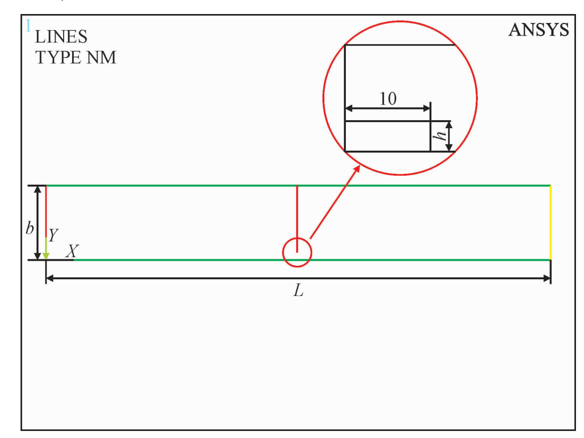


图 2　管道裂纹尺寸

Fig. 2　Crack size

2.2　载荷及边界条件

管道等薄壁容器在承受一定内压时,其管壁内

"环向纤维"要伸长,同时"纵向纤维"缩短,因此产生环向应力与轴向应力。在对管道模型进行约束时,为保证形变尽量真实,故对管道 1/4 模型环向两端面添加对称约束,而在轴向,一端面轴向自由度为 0,另一端面边界条件为此内压下的轴向应力 σ_z。依由文献[9]可知管道属于压力容器类,依据材料力学中对承压管道端面轴向应力的计算,其表达式为

$$\sigma_z = \frac{pd}{4\delta} \tag{15}$$

其中 d 为管道中面直径,单位 mm,其余参数与上同。由于所施加边界条件具备对称性,且模型中并不存在结构设计不合理所导致的应力集中因素,管道模型长度并不会对分析结果产生影响,故采用此模型进行有限元仿真分析。

2.3 应力计算

对 1/4 管道存在的裂纹缺陷环焊缝进行静力学求解计算,在 8 MPa 内压下,裂纹相对深度为 0.1 δ 的情况下,裂纹缺陷部位的等效应力云图如图 3 所示。

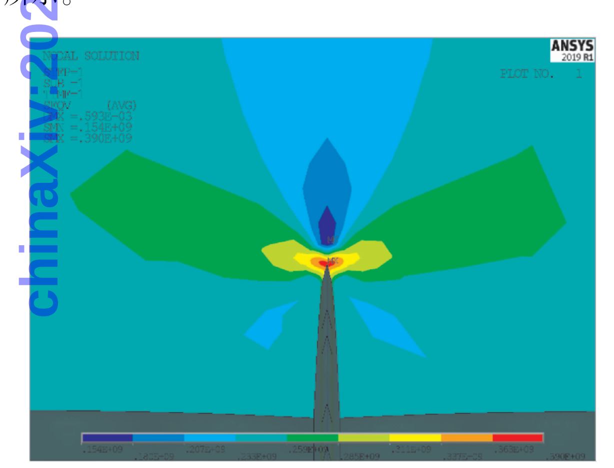


图 3 裂纹处等效应力分布

Fig. 3 Equivalent stress distribution at the crack

2.4 力-磁耦合仿真

力磁耦合分析步骤为:将静力学分析所获取的管道应力情况作为已知项,利用力磁耦合模型中所推导的公式进行静磁学分析,即提取出静力学计算所得到每个单元的等效应力状态,通过每个节点上的等效应力计算出其对应的相对磁导率,并计算在地磁场作用下各单元的磁感应强度。

在管道外建立合适大小且相对磁导率为 1 H/m 的空气层,对管道和空气层分别进行网格划分,读取出管道各单元的相对磁导率;选用地磁场模拟中常用的迪利克雷边界条件,对管道及空气域模型一轴端面施加磁场强度为 40 A/m 的地磁场,另一端面施加磁场强度为 0。对管道和空气层施加一个等效的地磁场强度,最后进行求解计算。建立的空气层及管道几何体如图 4 所示,二者网格划分如图 5 所示。

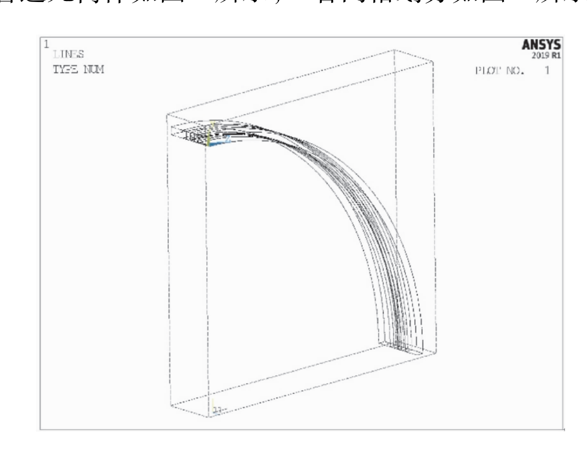


图 4 管道及其外部空气层

Fig. 4 Pipe and its outer air layer

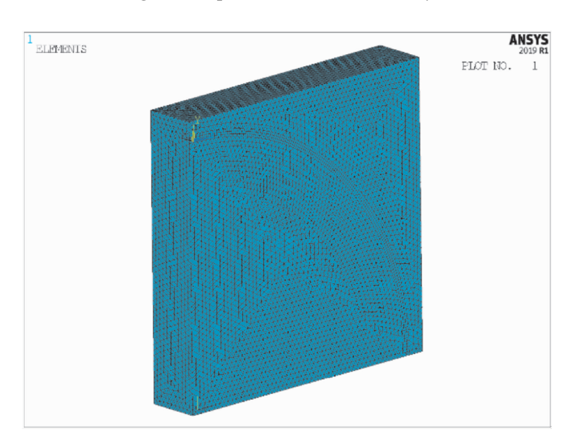


图 5 构件及空气层网格划分

Fig. 5 Mesh division of components and air layer

研究在不同内压作用下的裂纹缺陷在空间产生的磁感应强度变化分布,选取裂相对深度为 0.1 δ,管道内压分别为 8 ~ 12 MPa 时裂纹附件的磁感应强度变化。通过李远利等[10]的研究发现,发现当提离值在 4 ~ 7 mm 时,磁信号对裂纹的评估最为有效准确,故本研究的路径高度提取范围也在此区间。研究路径选取管道轴向(Z 方向)正上方一定提离高度的磁感应强度,裂纹缺陷位于路径的中间点。图 6 为路径高度为 4.4 mm,不同内压作用的切向磁感应

强度 B_x 的变化曲线，图 7 为相同路径及内压管道法向磁感应强度 B_y 的分布曲线。

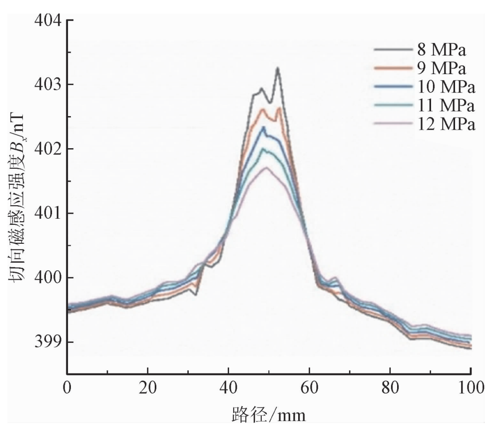


图 6　不同压力下切向磁感应强度

Fig. 6　Tangential magnetic induction intensity under different pressures

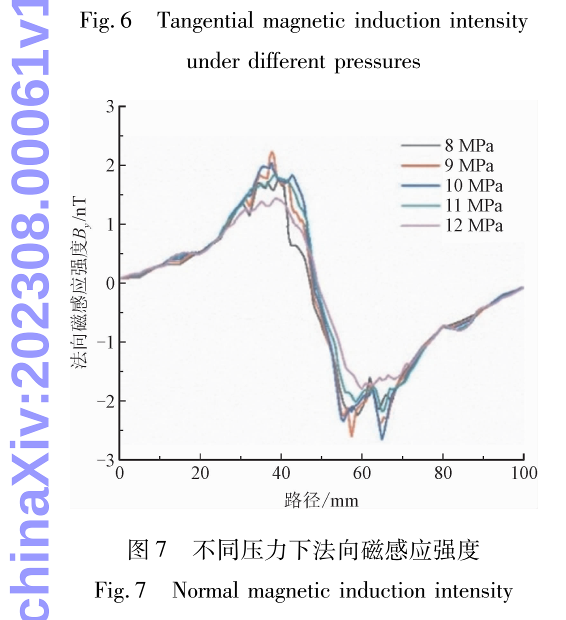


图 7　不同压力下法向磁感应强度

Fig. 7　Normal magnetic induction intensity under different pressures

由图 6 及图 7 可知，当压力从 8 MPa 升至 12 MPa时，切向的磁感应强度 B_x 与法向的磁感应强度 B_y 的变化都很微弱，可以推断由裂纹缺陷所引起的管道上方磁场变化在一定范围内压内的变化并不明显。

由上可知，裂纹缺陷所引起的管道环焊缝上方磁感应强度变化在一定范围内压内的变化并不明显，因此限定管道内压为 8 MPa，研究路径高度为 4.4 mm，选取不同裂纹相对深度，研究当裂纹的相对深度变化分别为 0.1 δ ~0.5 δ 变化时管道上方磁场变化规律。图 8 表示不同裂纹相对深度管道切向磁感应强度 B_x 的变化曲线，图 9 表示不同裂纹相对深度管道法向磁感应强度 B_y 的变化曲线。

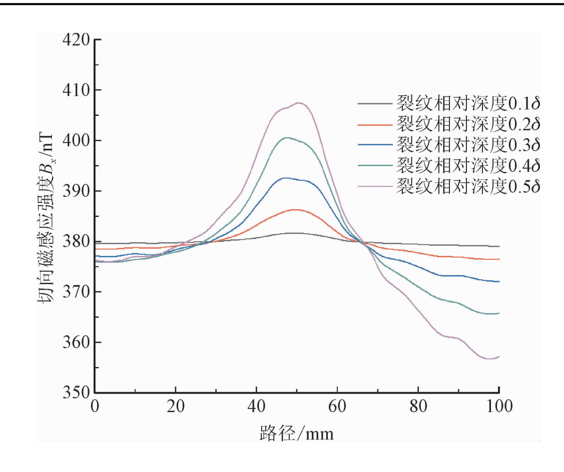


图 8　不同裂纹相对深度切向磁感应强度

Fig. 8　Tangential magnetic induction intensity of different crack depths

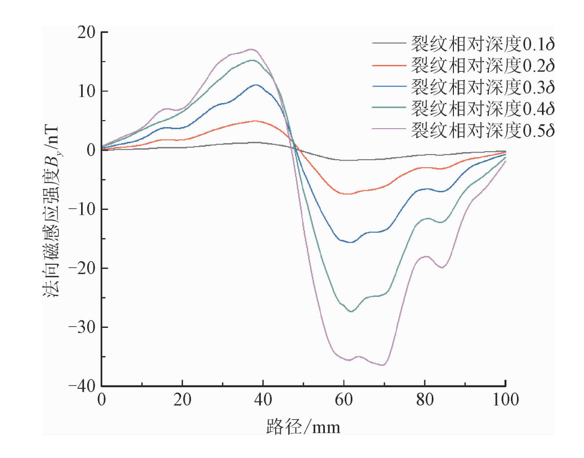


图 9　不同裂纹相对深度法向磁感应强度

Fig. 9　The normal magnetic induction intensity of different crack depths

由图 8 可知，裂纹缺陷的管道环焊缝切向磁感应强度 B_x 在裂纹处峰值变化随着裂纹相对深度加深而增大。由图 9 可知，裂纹缺陷的管道环焊缝法向磁感应强度 B_y 在裂纹处磁感应强度变化曲线斜率随着裂纹相对深度加深而增大。当管道环焊缝存在裂纹缺陷时，在裂纹处的应力-地磁场耦合作用下，裂纹相对深度越深，其产生的磁感应强度则越大。其具体表象为管道切向磁感应强度 B_x 极值增大，法向磁感应强度 B_y 变化斜率增大。

3　李萨如图评价

磁记忆信号表征的是应力集中程度的大小，应力集中越大，漏磁场的 B_x 极值与 B_y 斜率的特征就越明显，但磁感应信号值的大小并不仅仅与应力集中所导致的漏磁场大小相关，还与地磁场强度、金属

本身磁导率、金属磁化性质、检测时的提离高度等因素相关。李萨如(Lissajous)图是两个相互垂直方向上的频率成整数比的简谐振动合成的封闭轨迹图形。任吉林等[11-12]采用磁记忆检测含缺陷试件的拉伸实验中应力对磁信号的影响,并使用李萨如图面积对应力状态进行分析,结果表明李萨如图分析方法是一种有效的磁记忆检测定量分析方法。李萨如图封闭区域大小反应应力集中程度,可以作为磁记忆检测定量化分析的判据[13]。均采用梯度的好处是避免了其他环境或金属自身因素影响磁感应强度幅值大小,进而影响对应力集中及危险程度的判断。故本研究采用李萨如图对应力集中程度进行分析,并以此作为裂纹缺陷危险程度的判据。以管道运行压力为 8 MPa 时,不同裂纹相对深度的磁感应强度的梯度值作为分析数据,对比相对深度不同的裂纹缺陷。不同裂纹相对深度下的切向与法向磁感应梯度值如图 10 ~ 11 所示,以法向磁感应强度梯度值 K_x 为 X 轴,切向磁感应强度梯度值 K_y 为 Y 轴绘制李萨如图形如图 12 所示。

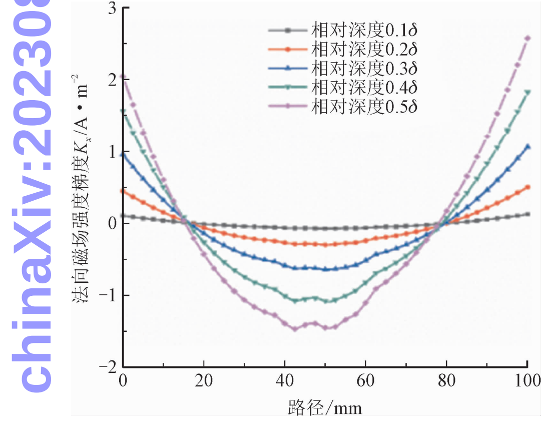


图 10 不同裂纹相对深度的 K_x

Fig. 10 K_x for different relative crack depth

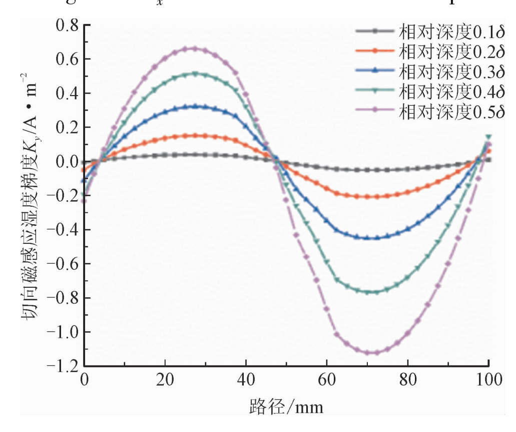


图 11 不同裂纹相对深度的 K_y

Fig. 11 K_y for different relative crack depths

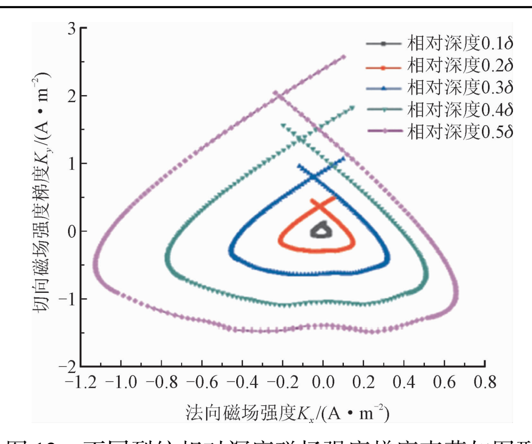


图 12 不同裂纹相对深度磁场强度梯度李萨如图形

Fig. 12 Lissajous graph of the magnetic field intensity gradient in different cracks in relative depth

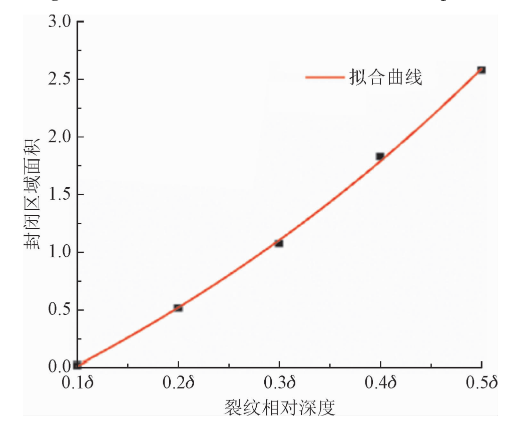


图 13 李萨如图形封闭区域面积拟合曲线

Fig. 13 The fitting curve of Lissajous figure closed area

由图 12 可知,当裂纹相对深度为 0.1 δ 时封闭区域的面积较小,随着裂纹相对深度的增加,李萨如图封闭区域面积逐渐增大,说明缺陷的危险程度也在增大,且增长速度较快。分析结果与任吉林等[11-12]通过拉伸实验发现的李萨如图面积与应力集中程度之间联系具有较好的一致性。

李萨如图封闭区域的面积计算见表 2。

表 2 磁场梯度李萨如图形封闭区域面积

Tab. 2 The closed area of the magnetic field gradient Lissajous figure

裂纹相对深度	封闭区域面积
0.1 δ	0.012 173 778 163 992
0.2 δ	0.502 598 823 905 3
0.3 δ	1.064 402 464 922 5
0.4 δ	1.822 873 630 526 5
0.5 δ	2.574 047 476 916 9

裂纹相对深度与李萨如封闭区域面积的变化趋势如图 13 所示,可以看出二者之间的关系呈指数增

长，对磁感应强度李萨如图封闭面积做一阶指数增长拟合，得到封闭区域面积与裂纹相对深度 h 关系，即

$$S = 2.53379 e^{h/0.638} - 2.96004 \qquad (16)$$

4 结　论

1）通过对磁致伸缩效应的介绍与阐述，采用力磁耦合的方式，建立了磁导率与应力之间的关系式。

2）对三维管道裂纹缺陷进行了静力学分析并通过力-磁耦合的方式，提取了不同内压、不同裂纹相对深度时的裂纹磁感应强度，分析结果表明：在一定内压范围内，裂纹缺陷所引起的管道环焊缝上方磁感应强度变化并不明显；当保持路径高度与管道内压一定时，裂纹相对深度越大，其产生的漏磁场则越大，即磁感应强度越大，其具体表象为管道上方空间切向磁感应强度 B_x 极值增大，法向磁感应强度 B_y 变化斜率增大。

3）采用李萨如图封闭区域面积表征应力集中程度，并于任吉林等人实验结果具有良好的一致性。通过数值拟合得到一定内压下李萨如图封闭区域面积与裂纹缺陷相对深度的关系式，拟合关系式见公式(16)；在磁记忆检测中可利用所测得磁感应强度值计算其在法向和切向变化梯度，并绘制相应李萨如图，通过李萨如图封闭区域面积判定环焊缝危险程度，为金属磁记忆检测分析人员提供思路。

参考文献：

[1] 祖瑞丽. 基于金属磁记忆对焊缝质量的评价研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2018.

[2] 时朋朋，郝帅. 磁记忆检测的力磁耦合型磁偶极子理论及解析解[J]. 物理学报，2021，70(3)：99-108.
SHI Pengpeng，HAO Shuai. Analytical solution of magneto-mechanical magnetic dipole model for metal magnetic memory method[J]. Acta physica Sinica，2021，70(3)：99-108(in Chinese).

[3] 邢海燕，陈玉环，李雪峰，等. 基于动态免疫模糊聚类的金属焊缝缺陷等级磁记忆识别模型[J]. 仪器仪表学报，2019，40(11)：225-232.
XING Haiyan，CHEN Yuhuan，LI Xuefeng，et al. Magnetic memory identification model of mental weld defect levels based on dynamic immune fuzzy clustering[J]. Chinese journal of scientific instrument，2019，40(11)：225-232(in Chinese).

[4] 刘怡，胡博，代占鑫，等. Q235 钢短裂纹扩展的力-磁耦合模拟[J]. 金属热处理，2018，43(12)：226-231.
LIU Yi，HU Bo，DAI Zhanxin，et al. Simulation of short crack propagation in Q235 steel based on coupling of stress and magnetic[J]. Heat treatment of metals，2018，43(12)：226-231(in Chinese).

[5] 任尚坤，祖瑞丽. 基于磁记忆技术对含缺陷焊缝的疲劳试验[J]. 航空学报，2019，40(3)：246-257.
REN Shangkun，ZU Ruili. Fatigue test of welds with defects based on magnetic memory technology[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica，2019，40(3)：246-257(in Chinese).

[6] 冯端. 金属物理学[M]. 北京：科学出版社，2000.

[7] 王社良，王威，苏三庆，等. 铁磁材料相对磁导率变化与应力关系的磁力学模型[J]. 西安科技大学学报，2005，25(3)：288-291，305.
WANG Sheliang，WANG Wei，SU Sanqing，et al. A magneto-mechanical model on differential permeability and stress of ferromagnetic material[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology，2005，25(3)：288-291，305(in Chinese).

[8] 陈利琼，宋利强，吴世娟，等. 基于有限元方法的滑坡地段输气管道应力分析[J]. 天然气工业，2017，37(2)：84-91.
CHEN Liqiong，SONG Liqiang，WU Shijuan，et al. FEM-based stress analysis of gas pipelines in landslide areas[J]. Natural gas industry，2017，37(2)：84-91(in Chinese).

[9] 王心明，麦克 W Z. 工程压力容器设计与计算[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2011.

[10] 李远利，李著信，姜玉泉. 金属管道焊接裂纹磁记忆检测中提离值对信号特征影响的实验研究[J]. 中国储运，2012(2)：115-116.
LI Yuanli，LI Zhuxin，JIANG Yuquan. Experimental research on the influence of lift-off value on signal characteristics in metal pipeline welding crack magnetic memory detection[J]. China storage & transport，2012(2)：115-116(in Chinese).

[11] 任吉林，孙金立，周培，等. 磁记忆二维检测的研究与工程应用[J]. 机械工程学报，2013，49(22)：8-15.
REN Jilin，SUN Jinli，ZHOU Pei，et al. Engineering application prospect and research on magnetic memory in two-dimensional testing[J]. Journal of mechanical engineering，2013，49(22)：8-15(in Chinese).

[12] 周培，任吉林，孙金立，等. 李萨如图在磁记忆二维定量检测中的应用[J]. 航空学报，2013，34(8)：1990-1997.
ZHOU Pei，REN Jilin，SUN Jinli，et al. Application of Lissajous figure in two-dimensional magnetic memory detection[J]. Acta aeronautica et astronautica Sinica，2013，34(8)：1990-1997(in Chinese).

[13] 任吉林，王进，范振中，等. 一种磁记忆检测定量分析的新方法[J]. 仪器仪表学报，2010，31(2)：431-436.
REN Jilin，WANG Jin，FAN Zhenzhong，et al. New method for metal magnetic memory quantitative analysis[J]. Chinese journal of scientific instrument，2010，31(2)：431-436(in Chinese).

（编辑　张璐）